

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA ENERGETIKY

Účinnost kotle při spalování uhlí u kotle s přímým foukáním.

Boiler Efficiency at Coal Combustion in Boiler with Direct Blowing

Student: Robert Gurský

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student: **Robert Gurský**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Účinnost kotle při spalování uhlí u kotle s přímým foukáním**
Boiler Efficiency at Coal Combustion in Boiler with Direct Blowing

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši kotlů pro spalování černého uhlí zaměřenou na spalování ve vzhledu
2. Proveďte stechiometrické výpočty
3. Stanovte popelovou bilanci a bilanci na straně vzduchu
4. Analyzujte vliv obsahu balastu na jednotlivé ztráty

Seznam doporučené odborné literatury:

DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Skripta ČVUT Praha, 2002.
ISBN 80-01-02591-8.
VILÍMEC, L. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Skripta VŠB TU Ostrava, 2008.
ISBN 978-80-248-1853-5.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ladislav Vilímec**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

„ Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci Účinnost kotle při spalování uhlí u kotle s přímým foukáním vypracoval samostatně.“

V Ostravě.....

20.5.2013

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2013

.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Robert Gurský

Adresa trvalého pobytu autora práce :

Za Humny 10, Rohatec 696 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Gurský, R. Účinnost kotle při spalování uhlí u kotle s přímým foukáním. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky 2013, 47 stran, Vedoucí práce: Vilimec, L.

Bakalářská práce se zabývá účinností granulárního kotle s přímým foukáním pro spalování černého uhlí, které je v České republice tradičním zdrojem energie. Práce je strukturovaná do tří základních částí. První část je teoretická, zaměřená na popis funkce spalovacích zařízení a jejich dělení, na popis procesu přípravy paliva a jeho spalování ve stávajícím provozu elektrárny Dětmarovice. Ve druhé, praktické části jsou provedeny stechiometrické výpočty pro palivo a jeho spotřebu a je stanovena popelová bilance a bilance na straně vzduchu. V poslední, závěrečné části je provedeno porovnání vlivu obsahu jednotlivých složek balastu na dílčí ztráty a porovnána výsledná propočtená hodnota účinnosti kotle s hodnotou skutečnou.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Gurský, R. Boiler Efficiency at Coal Combustion in Boiler with Direct Blowing Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2013, 47 pages, Thesis head: Vilimec, L.

The bachelor's thesis deals with the efficiency of a dry bottom boiler equipped with a direct blowing for combustion of black coal, which is a traditional energy source in the Czech Republic. The thesis is structured into three principal sections. The first is the theoretical one, focused on the description of function of combustion equipments and their classification, the description of the process of fuel preparation and its combustion in the existing plant of the Dětmarovice power station. In the second, practical one, there is carried out the stoichiometric calculation for fuel and its consumption and there are determined the ash and air balances. In the last, final section it is performed a comparison of the impact of the content of separate ballast components on partial losses and is compared the resulting calculated value of efficiency of the boiler to the actual one

Obsah

Použité značení	8
Zadané výpočtové parametry	10
1. Úvod.....	11
2. Energie	12
3. Kotel.....	13
3.1 Obecný význam kotle	13
3.1.1 Rozdělení kotlů	13
3.2 Kotle pro spalování tuhých paliv, druhy ohnišť	14
3.2.1 Tuhá paliva	14
3.2.3 Příprava paliva	15
3.2.4 Dělení kotlů podle způsobu spalování a druhu ohniště	18
3.2.5 Spalování práškového uhlí ve vzhledu.....	19
3.3 Elektrárna Dětmárovice	21
3.3.1 Popis výrobního bloku elektrárny	22
3.3.2 Popis spalovacího zařízení (kotle)	22
3.3.3 Schéma tlakového celku kotle	24
4. Stechiometrické výpočty.....	25
5. Účinnost kotle	35
5.1 Tepelné ztráty kotle	35
5.1.1 Ztráta mechanickým nedopalem.....	36
5.1.2 Ztráta chemickým nedopalem.....	36
5.1.3 Ztráta sáláním a vedením do okolí.....	37
5.1.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	37
5.1.5 Ztráta citelným teplem spalín (komínová).....	38
5.2 Stanovení účinnosti kotle.....	38
5.2.1 Množství paliva.....	38
6. Stanovení popelové bilance a bilance na straně vzduchu	40
6.1 Popelová bilance	40
6.2 Bilance na straně vzduchu	41
7. Vliv obsahu balastu na jednotlivé ztráty.....	42
7.1 Obsah vody v palivu	42
7.2 Obsah popeloviny v palivu	42

7.3 Vliv balastu na jednotlivé tepelné ztráty.....	43
7.3.1 Vliv popeloviny na ztrátu mechanickým nedopalem	43
7.3.2 Vliv popeloviny na ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků.....	44
7.3.3 Vliv popeloviny na ztrátu citelným teplem spalin	44
7.3.4 Vliv vody na ztrátu citelným teplem spalin	44
8. Porovnání účinnosti kotle	45
9. Závěr	47
Seznam použité literatury	

Použité značení

η_k	[%]	Účinnost kotle
A^r	[%]	Procento popeloviny v surovém vzorku paliva
C_i	[1]	Podíl hořlaviny v uvažovaném druhu tuhých zbytků
c_{pCO_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita oxidu uhličitého
c_{pH_2O}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita vodní páry
c_{pN_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita dusíku
c_{pSO_2}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita oxidu siřičitého
c_p	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita popílku
c_{pSP}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita spalín
M_{pal}	$[kg \cdot s^{-1}]$	Množství přivedeného paliva
M_V	$[kg \cdot s^{-1}]$	Množství spáleného paliva
Q_V	[MW]	Výrobní teplo
Q_i	[MW]	Výhřevnost paliva
t_o	[°C]	Teplota okolí
t_s	[°C]	Teplota spalín za kotlem
V_{Ar}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem argonu
V_{CO_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem oxidu uhličitého
$V_{H_2O,S}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem vody ve spalínách
V_{O_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem kyslíku
$V_{O_2,min}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální měrný objem spalovacího kyslíku
V_{SO_2}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem oxidu siřičitého
V_{SPS}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem suchých spalín
V_{SPV}	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Měrný objem vlhkých spalín
$V_{VZ,min}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální měrný objem suchého vzduchu
$V_{VZV,min}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Minimální měrný objem vlhkého vzduchu
$V_{VZ,skut}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Skutečný měrný objem suchého spalovacího vzduchu
$V_{VZV,skut}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	Skutečný měrný objem vlhkého spalovacího vzduchu
X_i	[1]	Podíl popela v nedopalu
Z_C	[%]	Ztráta mechanickým nedopalem

Z_{CS}	[%]	Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce
$Z_{CÚ}$	[%]	Ztráta mechanickým nedopalem v úletu
Z_{CO}	[%]	Ztráta chemickým nedopalem
$Z_{S_{vj}}$	[%]	Ztráta sáláním a vedením do okolí
Z_f	[%]	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
Z_K	[%]	Ztráta citelným teplem spalin (komínová)
n	[1]	Součinitel přebytku vzduchu
W^r	[%]	Procento vody v surovém vzorku paliva
ω_{Ar}	[%]	Koncentrace argonu ve spalinách
ω_{CO_2}	[%]	Koncentrace oxidu uhličitého ve spalinách
ω_{H_2O}	[%]	Koncentrace vody ve spalinách
ω_{N_2}	[%]	Koncentrace dusíku ve spalinách
ω_{O_2}	[%]	Koncentrace kyslíku ve spalinách
ω_{SO_2}	[%]	Koncentrace oxidu siřičitého ve spalinách

Zadané výpočtové parametry

Prvkový rozbor černého uhlí (Ostravsko-karvinská pánev), surového vzorku „r“

$$C^r = 60,22 [\%] \quad O^r = 4,83 [\%] \quad H^r = 3,59 [\%] \quad N^r = 0,85 [\%] \quad S^r = 0,37 [\%]$$

$$W^r = 8,1 [\%] \quad A^r = 22,04 [\%]$$

Výhřevnost

$$Q_i^r = 23,42 [\text{MJ/kg}]$$

Výrobní teplo kotle

$$Q_v = 514,1 [\text{MW}_t]$$

Parní výkon

- *Vysokotlaká pára*

$$\dot{m}_p = 650 [\text{t} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$t_p = 540 [^\circ\text{C}]$$

$$p_p = 17,4 [\text{MPa}]$$

- *Nízkotlaká pára*

$$\dot{m}_p = 580 [\text{t} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$t_p = 540 [^\circ\text{C}]$$

$$p_p = 17,4 [\text{MPa}]$$

Přebytek vzduchu

$$n = 1,3 [-]$$

Vztažná teplota okolí

$$t_o = 20 [^\circ\text{C}]$$

Teplota spalin za kotlem

$$t_s = 130 [^\circ\text{C}]$$

1. Úvod

V této bakalářské práci se zabývám stanovením účinnosti granulačního kotle spalujícího černého uhlí ve vzhledu a analyzuji vliv obsahu balastu na jednotlivé ztráty. Tato práce stručně popisuje funkci spalovacích zařízení a jejich rozdělení, proces přípravy paliva, ale také stanovení účinnosti kotle. Význam zvyšování účinnosti spalovacích zařízení a celkový dosažený přínos se projeví nejen v úspoře paliva, ale i ve snížení produkce škodlivin a rovněž ve snížení produkce CO_2 . Tento model je prezentován na stávajícím provozu elektrárny Dětmárovice, kde je kotel tohoto typu a výkonu instalován. Dále zpracovávám stechiometrické výpočty pro palivo, jeho spotřebu a stanovuji popelovou bilanci a bilanci na straně vzduchu. Porovnávám vliv obsahu jednotlivých složek balastu na dílčí ztráty. V závěru práce provádím porovnání účinnosti kotle propočtené dle zadaných parametrů se skutečně dosaženými hodnotami v rámci provozu elektrárny Dětmárovice.

2. Energie

Energie je veličina, kterou lze popsat jako schopnost hmoty konat práci. Energie se vyskytuje v různých formách. Z hlediska využití se rozlišuje primární energie od jinak upravené (zušlechtěné) energie, kterou energeticky vhodnými přeměnami získáme. Pro tuto práci jsem se zaměřil na transformaci primární energie paliva na tepelnou energii páry. Jedná se o přeměnu chemicky vázané energie fosilního paliva, kterým je černé uhlí.

K takovéto přeměně dochází ve spalovacím zařízení (kotel), kde dochází k transformaci chemicky vázané energie paliva na tepelnou energii plamene a spalin. Takto vzniklá energie se dále transformuje v kotli na tepelnou energii páry, která se dále transformuje na energii mechanickou a v konečné fázi na energii elektrickou (Rankin-Clausiusův kondenzační oběh). Nedílnou součástí transformace energie je účinnost, se kterou tyto děje probíhají. Přeměna primární energie na energii pracovní látky je doprovázena ztrátou energie, přičemž tuto ztrátu vyjadřuje účinnost kotle η_k .

Vyšší účinnost kotle znamená pro stejný výkon spalovacího zařízení menší množství spáleného paliva. To má za důsledek lepší ekonomiku energetického zdroje i pozitivnější dopad na hospodářský vývoj státu. V neposlední řadě se zvýšením účinnosti spalovacího zařízení snižuje ekologický dopad spalování uhlí, emise škodlivin i emise CO₂.

3. Kotel

3.1 Obecný význam kotle

Kotel je zařízení produkující tlakovou páru nebo horkou vodu pro otopné, technologické, nebo energetické účely. Obecně se kotel skládá z následujících částí:

- *Spalovací zařízení a jeho příslušenství* – ohniště, hořáky, rošt, ohříváky vzduchu, sací a vzduchové ventilátory, zařízení, které odvádí tuhé zbytky po spalování, a mlýnice.
- *Výměňiková část* – zde dochází k ohřátí vody, popřípadě k odpaření vody a následnému přehřívání vzniklé páry.

Speciálním případem jsou takzvané kotle na odpadní teplo, které se také nazývají utilizační kotle. U těchto kotlů chybí spalovací zařízení. Spaliny, přicházející do kotle jako odpadní produkt z cizího zdroje, představují teplotnosné médium. Příkladem takového zařízení je technologie plynové turbíny.

3.1.1 Rozdělení kotlů

Pro dělení kotlů existuje celá řada různých způsobů, nejčastěji se setkáme s dělením kotlů pomocí následujících předpokladů:

- *Podle použití* můžeme kotle dělit na elektrárenské, teplárenské, kotle pro EVO (spalovny), kotle pro vytopy, nebo utilizační kotle na odpadní teplo.
- *Podle druhu pracovního média* můžeme rozdělit kotle na kotle horkovodní a kotle parní. Horkovodní kotel můžeme definovat jako soubor zařízení sloužící pro ohřev vody na teplotu vyšší než 115 °C při tlaku vody vyšším než 0,17 MPa. Parní kotel lze definovat jako soubor zařízení, který se skládá z tlakového systému, kompletního ohniště, spalínového a vzduchového systému. Tento celek je konstrukčně uspořádán tak, aby sloužil k výrobě páry o tlaku vyšším než je tlak atmosférický.
- *Podle druhu použitého paliva* dělíme kotle na kotle spalující tuhá, kapalná a plynná paliva, případně alternativní palivo.
- *Podle druhu ohniště* rozeznáváme kotle roštové, práškové: granulární, resp. výtavné, fluidní, olejové, plynové.
- *Podle způsobu odpařování* mohou být kotle s přirozenou cirkulací, nebo kotle s průtočným výparníkem.

- *Podle tlaku* můžeme kotle dělit na nízkotlaké, které mají tlak pracovního média do 2,5 MPa, středotlaké, s tlakem pracovního média do 6,4 MPa, vysokotlaké, pro tlak do 22,5 MPa, a kotle s nadkritickými parametry páry nad 22,5 MPa.
- *Podle provedení parního systému* je možno kotle dělit na velkoprostorové, mezi které patří válcové, bateriové, plamencové, žárotrubné, kombinované, a maloprostorové (vodotrubnaté), které se obvykle dělí dle převážné polohy os svazků trubek ve výparníku na:
 - Šikmo trubnaté kotle – komorové
 - článkové
 - Strmotrubné kotle – bubnové s oběhem
 - přirozeným
 - povzbuzeným
 - průtočné
 - se superponovanou cirkulací
- *Podle způsobu nasazení* se rozeznávají kotle špičkové, pološpičkové a pro základní zatížení.

Konstrukce a vývoj parních kotlů se snaží především o zvyšování parametrů pracovního média, zlepšení spolehlivosti a hospodárnosti a v neposlední řadě o zvětšení jednotkových výkonů. Vyšší jmenovité tlaky a teploty vyrobené přehřáté páry, jakož i přihřívání páry, zlepšují termickou účinnost celého elektrárenského cyklu. Většinou tato řešení vedou k celkově větší složitosti celého zařízení a zhoršení spolehlivosti. V praxi existuje celá řada variant provedení kotlů, které se liší zejména řazením ohniště a jednotlivých výhřevných ploch a polohou spalínových tahů, do kterých jsou výhřevné plochy umístěny.

3.2 Kotle pro spalování tuhých paliv, druhy ohnišť

3.2.1 Tuhá paliva

Za tuhá fosilní paliva považujeme především hnědá a černá uhlí. Tuhá paliva se skládají z hořlaviny a přítěže, neboli balastu, tím rozumíme obsah vody a popela. Hořlavina je nejvýznamnější složkou paliva, neboť je nositelem energie. Hořlavina je složena z aktivních a pasivních prvků, z toho aktivní prvky jsou uhlík, vodík a síra. Jedná se o prvky hořlaviny, které jsou nositelem chemicky vázané energie, která se při spalování uvolňuje. Pasivní prvky tvoří kyslík a dusík, tyto prvky hořlaviny nepřinášejí žádnou energetickou hodnotu. Balast,

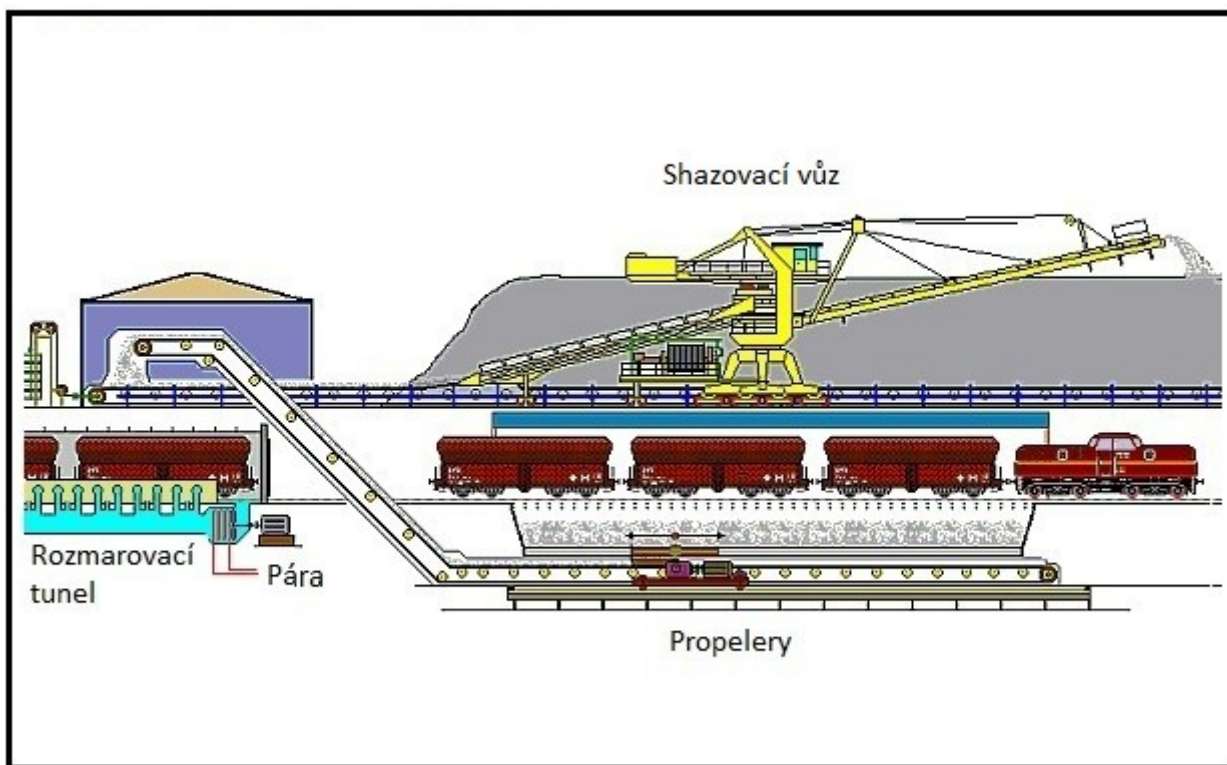
voda i popel, snižuje kvalitu paliva a má tedy vliv na celkovou konstrukci a provoz kotle. Významnější vliv na provoz kotle a jeho celkové řešení má obsah popelovin a především jejich složení, chemické a fyzikální vlastnosti. Pokud je balast tvořen převážně vodou, lze sušením paliva před jeho spalováním získat palivo s nižším obsahem vody a tedy i kvalitnější.

3.2.3 Příprava paliva

K úpravě tuhých paliv pro spalovací zařízení dochází jednak v místě těžby, to znamená přímo na dole nebo v třídírně a úpravně tuhých paliv, nebo také v místě spotřeby, na skládce a v kotelně. Při těžbě na dole se uhlí upravuje mechanicky, drcením velkých kusů, poté dochází k oddělování prachu, oddělování hlušiny a třídění na jednotlivé frakce podle granulometrie.

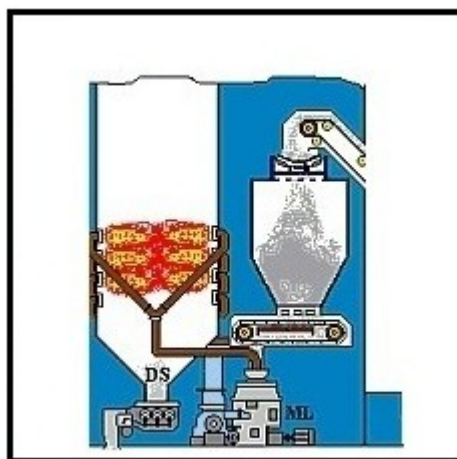
Příprava tuhých paliv pro spalování v místě spotřeby je nejméně náročná u kotlů s roštovým ohništěm. Nejčastěji se používá drcené a tříděné uhlí, takže příprava není žádná. U uhlí s velkým obsahem vody se palivo upravuje předsoušením a u spékavého typu uhlí se zvlhčuje. Pro práškové ohniště je příprava paliva poměrně složitá. Spalované palivo je dopraveno do mlýna, kde se suší a rozemele na požadovanou velikost. Poté je tříděno na určitou jemnost a odtud se dále dopravuje do hořáků spalovací komory.

Zařízení, které slouží k přípravě uhelného prášku v takzvaných mlýnech, se nazývá mlecí okruh. Tento okruh pro konkrétní typ práškového ohniště bude podrobněji popsán v další podkapitole. Předběžná příprava paliva, ke které dochází ve vnějším palivovém hospodářství, spočívá v převzetí uhlí z vagónů vybavených sklopnými bočnicemi do hlubinného zásobníku. Odtud dále pásovou dopravou pokračuje na palivovou skládku a z této skládky pokračuje k dalšímu zpracování. Schéma vnějšího palivového hospodářství je znázorněno na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Schéma palivového hospodářství kotelny na uhlí [6]

U vnitřního palivového hospodářství (viz obr. 2.2) je práce zaměřená na přípravu paliva pro práškové ohniště spalovacího zařízení. Jedná se o přípravu paliva, která se nachází u spalovacího zařízení a je určená pro granulační kotel spalující černé uhlí ve vzhledu.

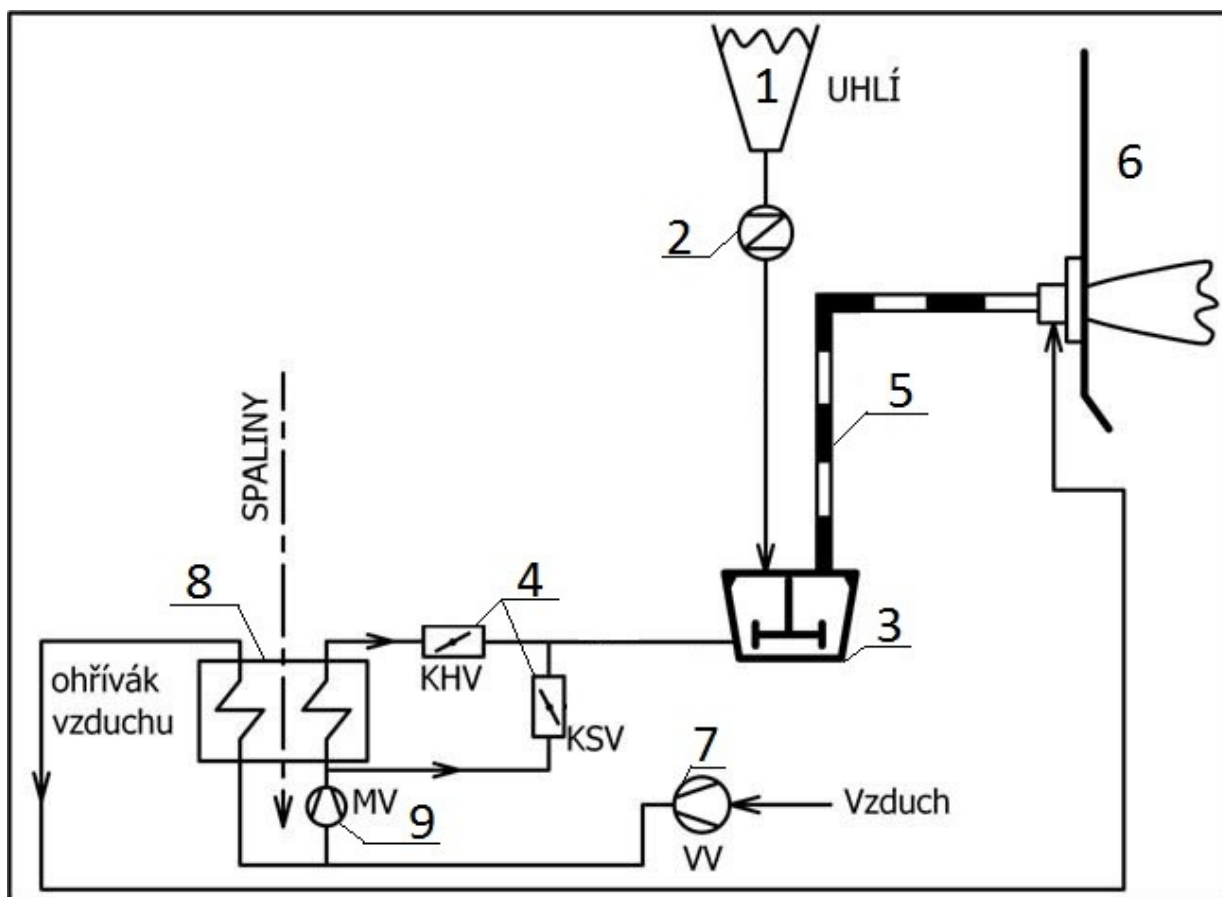


Obr. 2.2 Vnitřní palivové hospodářství [6]

Zařízení k přípravě uhelného prášku jsou umístěna přímo v kotelně. Nejčastěji se používají mlecí okruhy s přímým foukáním prášku do ohniště (viz obr. 2.3). V případě spalování černého uhlí, při sušení vzduchem, je uhlí dopravováno ze zásobníku vybaveného

uzávěrem do podavače, který jej dávkuje do sušičky. S dopravovaným palivem se do mlýna přivádí horký vzduch pro sušení paliva.

Ve mlýně se palivo rozemele na potřebnou granulometrii a dosuší se. Sušení ve mlýně je mnohonásobně intenzivnější, jelikož se v důsledku mletí měrný povrch paliva několikanásobně zvětší. Z mlýna je palivo dopravováno sušicím médiem do třídiče, kde se oddělí z paliva hrubá zrna, které se vrací zpět do mlýna, a prášek o požadované jemnosti se dopravuje dále až k samotným hořákům. Dopravu vzduchu přes mlýn zabezpečuje mlýnský ventilátor a mlecí okruh je v tomto případě přetlakový (viz obr. 2.3) Výhodou tohoto konstrukčního řešení mlecího okruhu s přímým foukáním je jednoduchost, nižší investiční náklady oproti jiným technologiím a také menší obestavěný prostor.



1 – Zásobník surového paliva, 2 – Podávač, 3 – Mlýn, 4 – Regulace vzduchu, 5 – Přívod primární směsi (palivo-vzduch), 6 – spalovací komora, 7 – vzduchový ventilátor, 8 – ohříváč vzduchu, 9 – mlýnský ventilátor

Obr. 2.3 Schéma mlecí soustavy [2]

3.2.4 Dělení kotlů podle způsobu spalování a druhu ohniště

Pro spalování tuhých paliv jsou vhodná a běžně používaná ohniště se spalováním:

- *Na roštu* - takzvané roštové ohniště, dodnes nejjednodušší způsob spalování tuhých paliv. Z hlediska způsobu obsluhy a jejich funkčního principu je dále můžeme rozdělit na kotle s pevným roštem a kotle s mechanickým roštem.
- *Ve fluidní vrstvě* - neboli fluidní ohniště. V tomto typu ohniště lze spalovat stejné druhy tuhých paliv jako u práškových nebo roštových kotlů. Základní rozdělení kotlů podle rychlosti v ohništi je zobrazeno na obr. 2.4. Podle tohoto hlediska dělíme kotle s fluidním ohništěm na dva základní typy, a to na kotle se stacionární, neboli bublinkovou fluidní vrstvou a kotle s cirkulující fluidní vrstvou.
- *Ve vzosu* - neboli práškové ohniště. Tuto metodu dodnes řadíme k nejpoužívanějším technologiím v průmyslové energetice, a to jak při výrobě tepla, tak i elektřiny. Z hlediska způsobu odvodu strusky z ohniště a technologie spalování uhléhného prášku rozděluje dále tyto kotle na kotle s granulačním ohništěm a kotle s výtavným ohništěm.

Pro znázornění z hlediska principu je také zajímavé dělení ohniště podle rychlosti proudění plynu v ohništi (viz obr. 2.4). Na obrázku je zjednodušeně znázorněný vznik fluidní vrstvy. V nádobě na roštu, která se nachází vlevo nad křivkou, je nejdříve nehybná vrstva zrnitého materiálu. Poté co se pod rošt přivádí vzduch, takzvaná fluidační tekutina, se s rostoucím množstvím a také rychlostí vzduchu zvyšuje tlaková ztráta nehybné vrstvy materiálu. Po dosažení tzv. prahové rychlosti fluidace W_f , začnou částice materiálu fluidovat, tím vznikne fluidní vrstva a částice se ocitnou v silové rovnováze.

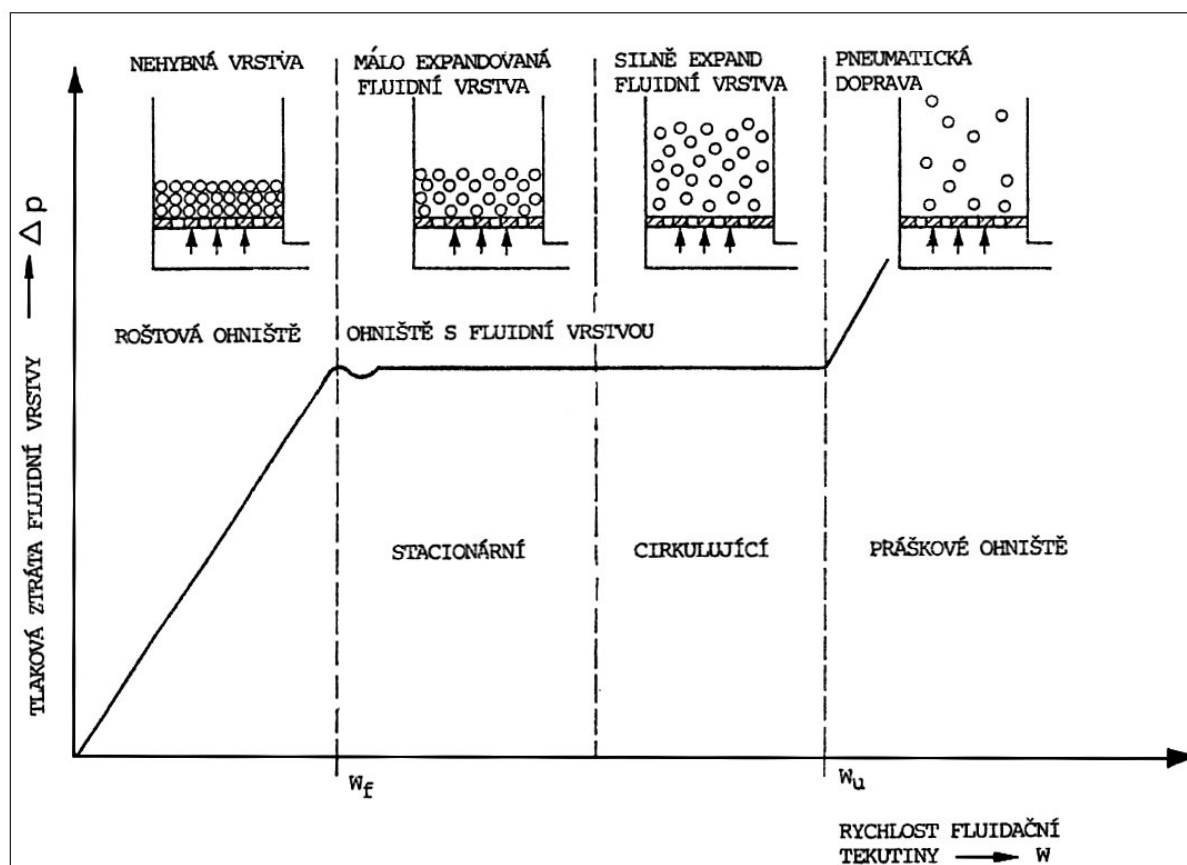
Při dalším zvyšování průtoku vzduchu fluidní vrstva začne expandovat, přičemž se tlaková ztráta fluidní vrstvy nemění. Pokud rychlost průtoku vzduchu dosáhne hodnoty prahové rychlosti úletu W_u , fluidní vrstva zaniká a začíná pneumatické dopravování do prostoru ohniště. Při zvyšování rychlosti nad hodnotu prahové rychlosti úletu W_u se zvyšuje i tlaková ztráta.

Dále bude pro účely této práce podrobněji popsáno spalování práškového uhlí ve vzosu pomocí kotle s granulačním ohništěm.

3.2.5 Spalování práškového uhlí ve vzhledu

Spalování práškového uhlí ve vzhledu probíhá výrazně rychleji než spalování uhlí na roštu, jelikož měrný povrch uhelného prášku je 100 krát až 1 000 krát větší. U tříděného uhlí se měrný povrch pohybuje průměrně kolem $1 \text{ až } 2 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ a doba spalování na roštu je cca 15 – 20 min. Při spalování uhelného prášku se pohybuje měrný povrch okolo $100 \text{ až } 2\,000 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ a doba spalování je cca 0,5 až 2 s. Spalováním uhelného prášku ve spalovací komoře vzniká jemný popílek vynášený z ohniště spaliny, čímž se mění popelová bilance tohoto ohniště. U práškových, granulačních kotlů je větší část popelovin ve formě popílku unášena spaliny a menší část popelovin opouští ohniště ve formě škváry.

U roštových kotlů je tomu naopak. U práškových ohnišť je důležitá také teplota při spalování. Při relativně nízkých teplotách spalování v ohništi dochází u větší části popeloviny ze spalovaného uhlí k tomu, že nepřekročí teplotu tečení, a tím pádem odchází popelovina z ohniště jako škvára a popílek v tuhé formě.

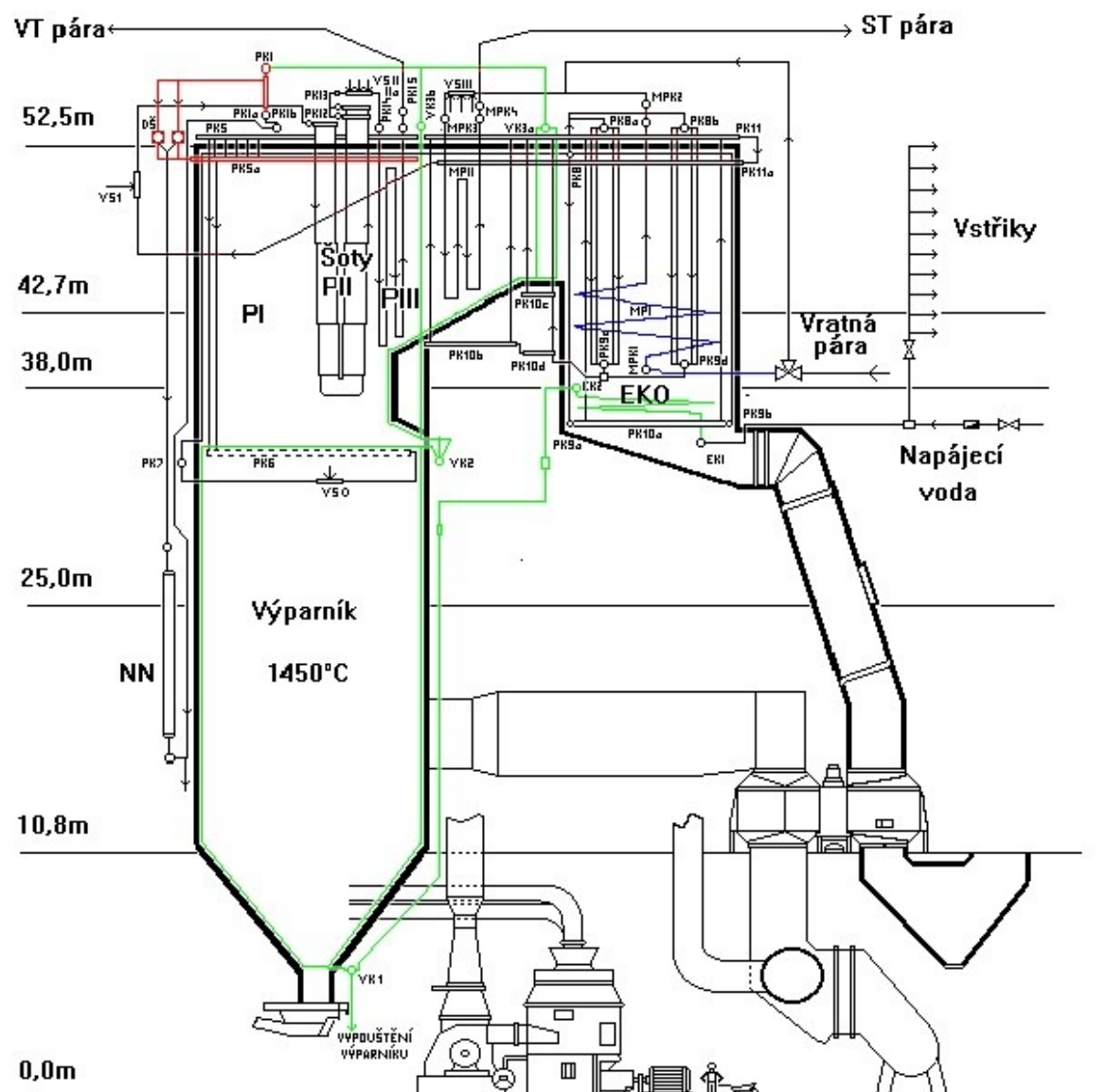


Obr. 2.4 Rozdělení ohnišť podle rychlosti proudění plynu [3]

3.2.5.1 Granulační ohniště

Pro tento typ ohniště je charakteristickým znakem větší vychlazení plamene tak, aby teplota v ohništi nepřesáhla teplotu tání popeloviny a současně bylo zabráněno vzniku struskových nánosů na stěnách ohniště, nebo vytváření tekuté strusky, byť pouze místní. Uvádí se, že u těchto ohnišť nepřekračuje teplota plamene 1100 °C až 1500 °C (v závislosti na druhu použitého paliva). V důsledku většího vychlazení ohniště se 15 až 30 % popeloviny odvádí v tuhém stavu z výsypky ohniště jako škvára a zbytek popeloviny je unášen spaliny jako popílek, který je nutno ze spalin odloučit pomocí odlučovače umístěného za kotlem.

Jedním z dalších charakteristických prvků granulačního ohniště je strusková výsypka, která je situovaná pod celým průřezem ohniště a uzavírá jej ve spodní části. Otvor pro odvod strusky je umístěn ve spodní části výsypky. Kotel s granulačním ohništěm je znázorněn na obr. 2.5.



3.3 Elektrárna Dětmarovice

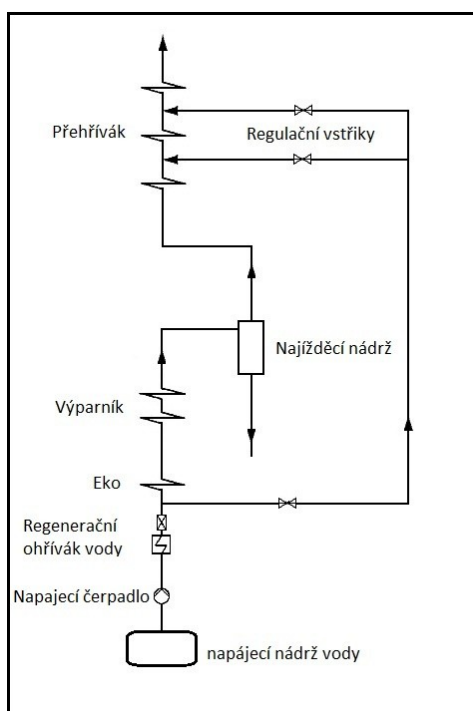
V této části se věnuji spalovacímu zařízení, které je umístěno ve stávajícím provozu elektrárny Dětmorovice. Jedná se o kotel s typem spalování práškového uhlí v granulačním ohništi ve vzhledu. Parametry tohoto kotle se téměř shodují se zadanými parametry modelového kotle.

3.3.1 Popis výrobního bloku elektrárny

V elektrárně Dětmorovice se nachází čtyři výrobní bloky, přičemž každý z nich má elektrický výkon 200 MW. Každý výrobní blok se skládá z kotle a turbogenerátoru, kdy jmenovitý výkon turbogenerátoru je 200 MW_e při jmenovitých otáčkách 3 000 otáček • min⁻¹. Výrobní kapacita kotle je 650 t • hod⁻¹ vysokotlaké páry při teplotě 535 °C a tlaku 16,2 MPa. Jeden blok průměrně spotřebuje 1 600 tun uhlí za den, kdy průměrná výhřevnost spalovaného černého uhlí je 22 MJ/kg a obsah síry v tomto uhlí je menší než 0,5 %. Dodávané uhlí pochází výlučně z Ostravsko-karvinské pánve. Používané kotle jsou vyprodukovány společností Vítkovice a jejich účinnost je okolo 90 %. Výrobní blok produkuje elektřinu o napětí 15,75 kV a do přenosové sítě se transformuje na úroveň 110 kV.

3.3.2 Popis spalovacího zařízení (kotle)

Každý z kotlů má výšku 60 m a je zavěšen na nosné ocelové konstrukci. Kotel je průtlačný (průtočný), neobsahuje bublen a jednotlivé části tlakového systému na sebe navzájem navazují (viz obr. 2.6).



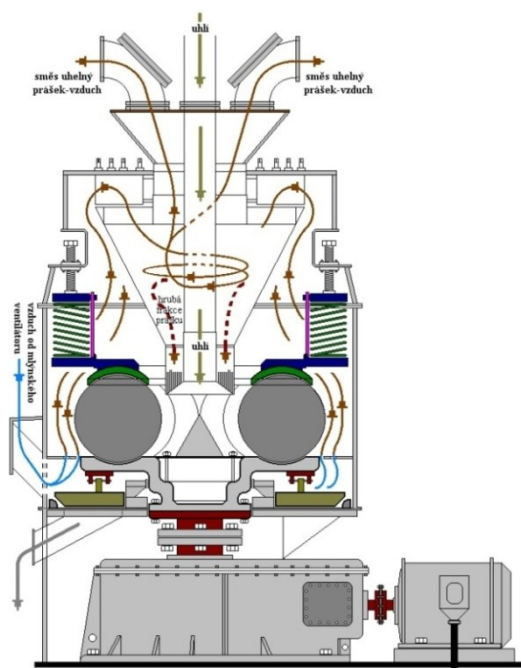
Obr. 2.6 Schéma průtočného kotle [2]

K regulaci kotle dochází tak, že se trvale udržuje stálý poměr mezi průtokem vody do kotle napájené a tepelným výkonem ohniště. Kotel je dvoutahový a spalovací komora má

rozměry 12 x 11 m. V rozích spalovací komory jsou umístěny práškové hořáky, přičemž osy hořáků směřují tangencionálně k myšlené kružnici ve středu výparníku. Toto řešení se používá zejména u kotlů nejvyšších výkonů. Stěny kotle jsou membránové a slouží jako výparník. V kotli je možno dosáhnout nejvyšší teploty 1450 °C. V horní části je spalovací komora zúžena nosem tvořeným z trubek, jež jsou vstupní částí přehříváku. Předehřívání vzduchu zde zabezpečuje regenerační ohřívák typu Ljungström, který je instalován v zadní části kotle.

Za každým kotlem jsou řazeny čtyři elektrostatické odlučovače typu Lurgi a dopravu spalin zabezpečují dva kouřové ventilátory. Dále jsou instalována odsiřovací zařízení, která se skládají ze dvou absorbérů od firmy Mitsubishi, kdy pro dva výrobní bloky slouží jeden absorbér. Doprava spalovacího vzduchu je zabezpečována dvěma vzduchovými ventilátory, vzduch se nasává zevnitř, nebo zvenku kotelny. Spalovací vzduch se poté ohřívá přes parní ohřívák vzduchu a rotační regenerační ohřívák a pokračuje do mlýnů a do samotných hořáků.

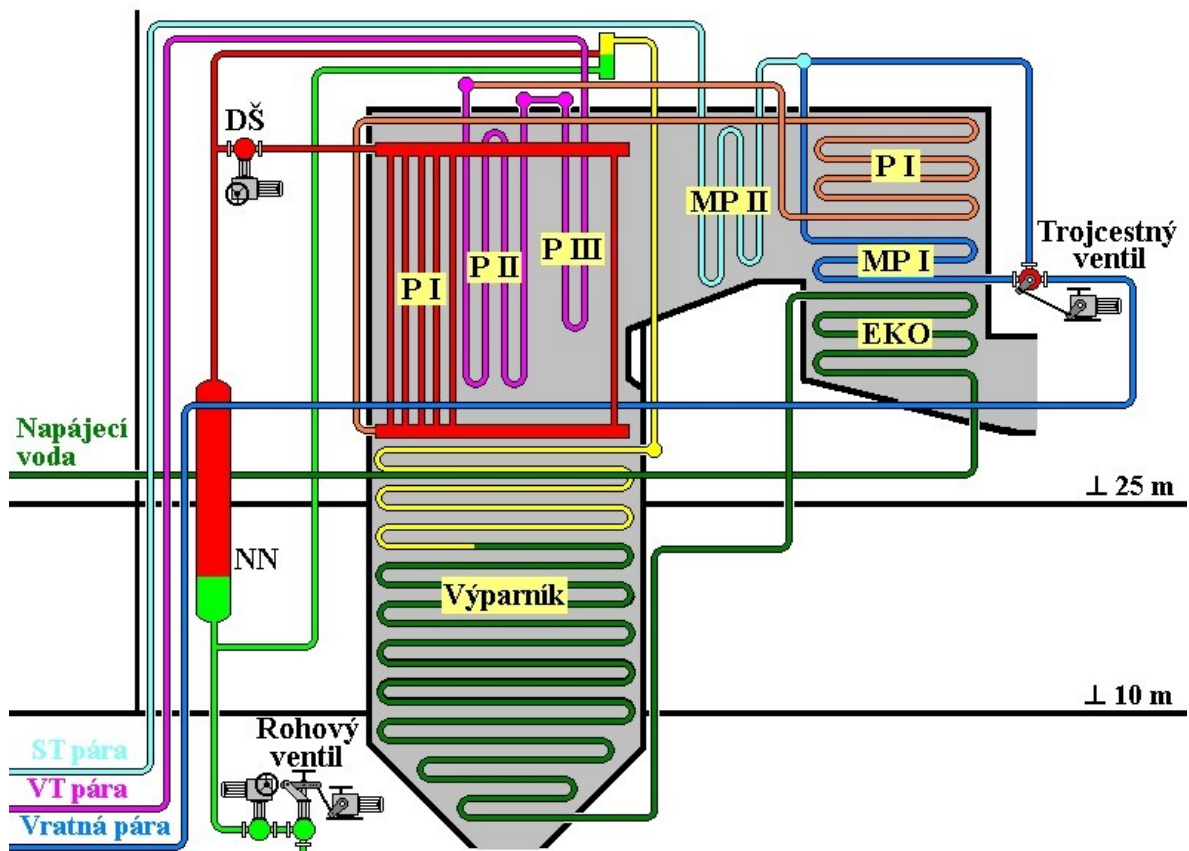
Příprava paliva pro každý kotel zvlášť je zajišťována mlecím zařízením, které je složeno ze čtyř mlecích okruhů s kroužkovými mlýny typu MKM 33 o výkonu $9,15 \text{ kg/s}^{-1}$ (viz obr. 2.7), dále mlýnským ventilátorem a ventilátorem na těsnící vzduch. Mediem pro sušení paliva je horký vzduch. Na provoz, při jmenovitém výkonu 650 t, stačí tři mlýny, čtvrtý slouží jako záloha. Pro “najíždění” kotle se používá zemní plyn a k zapalování hořáků slouží elektrická jiskra. Nakonec je kotel izolován minerální plstí a oplechován.



Obr. 2.7 Schéma kroužkového mlýnu MKM 33 [6]

3.3.3 Schéma tlakového celku kotle

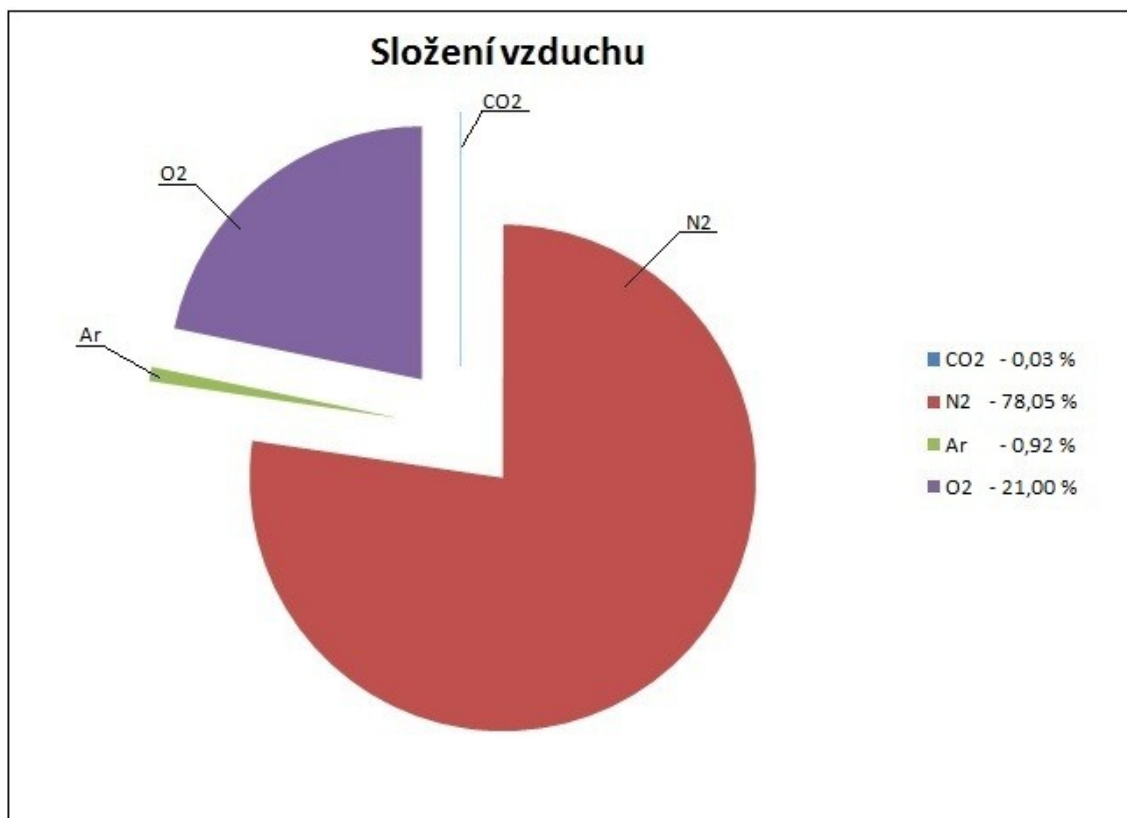
Kotel produkuje 650 t/h páry o tlaku 17 MPa a teplotě 540 °C, výrobu páry znázorňuje schéma na obr. 2.8. Napájecí voda je nejprve vedena přes ohřívák vody (tzv. EKO), který je jednosvazkový, dvouvětvový, a je umístěn před ohřívák vzduchu na konci druhého tahu. Zde se napájecí voda ohřívá na teplotu nižší než bod varu. Poté voda proudí do vstupní komory výparníku, takzvané první sekce výparníku, kde se voda dohřeje na teplotu bodu varu a část vody se odpaří. Takto vytvořená parovodní směs se vede do následující sekce výparníku, kde se postupně obsah páry ve směsi zvyšuje.



Obr. 2.8 Schéma tlakového celku (Voda pára) [6]

4. Stechiometrické výpočty

Tyto výpočty jsou zpracovány na základě literatury [1]. Objemové složení suchého vzduchu (viz graf. 4-1), který je zahrnut ve výpočtech. Uvažuji, že objemový podíl argonu je včetně vzácných plynů.



Graf 4-1 Objemové složení suchého vzduchu

Minimální objem kyslíku potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{02,min} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.1})$$

$$V_{02,min} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,6022}{12,01} + \frac{0,0359}{4,032} + \frac{0,0037}{32,06} - \frac{0,0483}{32} \right)$$

$$V_{02,min} = 1,313 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Minimální objem suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{VZ,min} = \frac{V_{O_2,min}}{0,21} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.2})$$

$$V_{VZ,min} = \frac{1,313}{0,21}$$

$$V_{VZ,min} = 6,252 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 kg paliva

Pro běžné klimatické podmínky volím podíl vodní páry připadající na 1 m_N³ suchého vzduchu vyjádřené součinitelem $\nu = 1,016$, který odpovídá přibližně relativní vlhkosti vzduchu $\varphi = 70$ [%] při teplotě $t_o = 20$ [°C].

$$V_{VZV,min} = \nu \cdot V_{VZ,min} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.3})$$

$$V_{VZV,min} = 1,016 \cdot 6,252$$

$$V_{VZV,min} = 6,352 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Minimální objem spalin při dokonalém spálení 1 kg paliva s minimálním množstvím vzduchu $V_{VZV,min}$

Objem oxidu uhličitého

$$V_{CO_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{VZ,min} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.4})$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot 0,6022 + 0,0003 \cdot 6,252$$

$$V_{CO_2} = 1,1180 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem oxidu siřičitého

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.5})$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0037$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,0025 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem dusíku

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,013} \cdot N^r + 0,7805 \cdot V_{\text{VZS},\text{min}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.6})$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,013} \cdot 0,0085 + 0,7805 \cdot 6,252$$

$$V_{\text{N}_2} = 4,8860 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem argonu

$$V_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot V_{\text{VZS},\text{min}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.7})$$

$$V_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot 6,252$$

$$V_{\text{Ar}} = 0,0575 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem suchých spalin vzniklých dokonalým spálením 1kg paliva s minimálním množstvím vzduchu

$$V_{\text{SPS},\text{min}} = V_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{SO}_2} \cdot V_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{Ar}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.8})$$

$$V_{\text{SPS},\text{min}} = 1,1180 \cdot 0,0025 \cdot 4,8860 \cdot 0,0575$$

$$V_{\text{SPS},\text{min}} = 6,0640 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem vodní páry ve spalínách

$$V_{H_2O,S} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,41}{18,015} \cdot W^r + (\vartheta - 1) \cdot V_{VZS,min} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.9})$$

$$V_{H_2O,S} = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,0359 + \frac{22,41}{18,015} \cdot 0,081 + (1,016 - 1) \cdot 6,252$$

$$V_{H_2O,S} = 0,5997 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem vlhkých spalin vzniklých dokonalým spálením 1 kg paliva s minimálním množstvím vzduchu

$$V_{SPV,min} = V_{VZS,min} + V_{H_2O,S} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.10})$$

$$V_{SPV,min} = 6,064 + 0,5997$$

$$V_{SPV,min} = 6,6637 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Procentní složení spalin vzniklých dokonalým spálením 1 kg paliva s minimálním množstvím vzduchu

$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SPV,min}} \cdot 100 = \frac{1,1180}{6,6637} \cdot 100 = 16,7774 \text{ [%]} \quad (\text{rovnice 4.11})$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{SPV,min}} \cdot 100 = \frac{0,002526}{6,6637} \cdot 100 = 0,0379 \text{ [%]} \quad (\text{rovnice 4.12})$$

$$\omega_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{SPV,min}} \cdot 100 = \frac{4,8860}{6,6637} \cdot 100 = 73,3226 \text{ [%]} \quad (\text{rovnice 4.13})$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SPV,min}} \cdot 100 = \frac{0,5997}{6,6637} \cdot 100 = 8,9995 \text{ [%]} \quad (\text{rovnice 4.14})$$

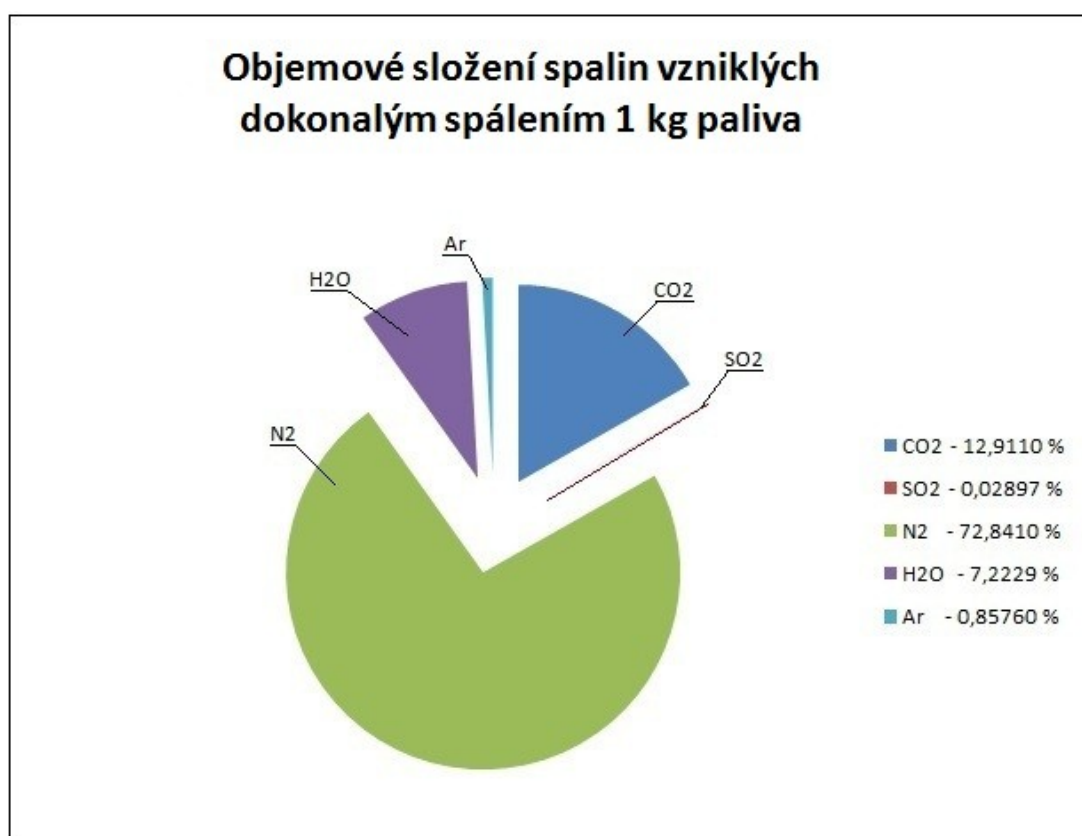
$$\omega_{Ar} = \frac{V_{Ar}}{V_{SPV,min}} \cdot 100 = \frac{0,05751}{6,6637} \cdot 100 = 0,86303 \text{ [%]} \quad (\text{rovnice 4.15})$$

Pro kontrolu :

$$\sum \omega = \omega_{\text{CO}_2} + \omega_{\text{SO}_2} + \omega_{\text{N}_2} + \omega_{\text{H}_2\text{O}} + \omega_{\text{Ar}}$$

$$\sum \omega = 16,7774 + 0,0379 + 73,3226 + 8,9995 + 0,86303$$

$$\sum \omega = 100,00$$



Graf 4-2 Objemové složení spalin vzniklých dokonalým spálením 1 kg paliva

Skutečný objem suchého vzduchu z 1 kg paliva

$$V_{\text{VZV},\text{min}} = n \cdot V_{\text{VZS},\text{min}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.16})$$

$$V_{\text{VZV},\text{min}} = 1,3 \cdot 6,252$$

$$V_{\text{VZV},\text{min}} = 8,1276 \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečný objem vlhkého vzduchu z 1 kg paliva

$$V_{VZV, \min} = n \cdot V_{VZV, \min} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.17})$$

$$V_{VZV, \min} = 1,3 \cdot 6,352$$

$$V_{VZV, \min} = 8,2576 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Skutečný objem spalín při spálení 1 kg paliva

Objem oxidu uhličitého

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{VZS} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.18})$$

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot 0,6022 + 0,0003 \cdot 8,1276$$

$$V_{\text{CO}_2} = 1,1256 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem oxidu siřičitého

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.19})$$

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0037$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,0025 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem dusíku

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,013} \cdot N^r + 0,7805 \cdot V_{VZS} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.20})$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,013} \cdot 0,0085 + 0,7805 \cdot 8,1267$$

$$V_{\text{N}_2} = 6,3503 \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem argonu

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{VZS} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.21})$$

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot 8,1267$$

$$V_{Ar} = 0,07477 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem kyslíku

$$V_{O_2} = 0,2195 \cdot (n - 1) \cdot V_{VZS} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.22})$$

$$V_{O_2} = 0,2195 \cdot (1,3 - 1) \cdot 8,1276$$

$$V_{O_2} = 0,5352 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem suchých spalin vzniklých spálením 1kg paliva

$$V_{SPS,skut} = V_{CO_2} \cdot V_{SO_2} \cdot V_{N_2} \cdot V_{O_2} \cdot V_{Ar} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.23})$$

$$V_{SPS,skut} = 1,1256 \cdot 0,002526 \cdot 6,3503 \cdot 0,5119 \cdot 0,07477$$

$$V_{SPS,skut} = 8,0883 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem vodní páry ve spalinách

$$V_{H_2O} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,41}{18,015} \cdot W^r + (9 - 1) \cdot V_{VZS} \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.24})$$

$$V_{H_2O} = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,0359 + \frac{22,41}{18,015} \cdot 0,081 + (1,016 - 1) \cdot 8,1276$$

$$V_{H_2O} = 0,6297 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$$

Objem vlhkých spalin vzniklých spálením 1 kg paliva

$$V_{SPV,skut} = V_{VZS,skut} + V_{H_2O} [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.25})$$

$$V_{SPV,skut} = 8,0883 + 0,6297$$

$$V_{SPV,skut} = 8,7180 [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Procentní složení skutečných spalin vzniklých spálením 1 kg paliva

$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{SPV,skut}} \cdot 100 = \frac{1,1256}{8,7180} \cdot 100 = 12,9110 [\%] \quad (\text{rovnice 4.26})$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{SPV,skut}} \cdot 100 = \frac{0,0025}{8,718} \cdot 100 = 0,0289 [\%] \quad (\text{rovnice 4.27})$$

$$\omega_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{SPV,skut}} \cdot 100 = \frac{6,3503}{8,7180} \cdot 100 = 72,8410 [\%] \quad (\text{rovnice 4.28})$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{SPV,skut}} \cdot 100 = \frac{0,6297}{8,7180} \cdot 100 = 7,2229 [\%] \quad (\text{rovnice 4.29})$$

$$\omega_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{SPV,skut}} \cdot 100 = \frac{0,5352}{8,7180} \cdot 100 = 6,1390 [\%] \quad (\text{rovnice 4.30})$$

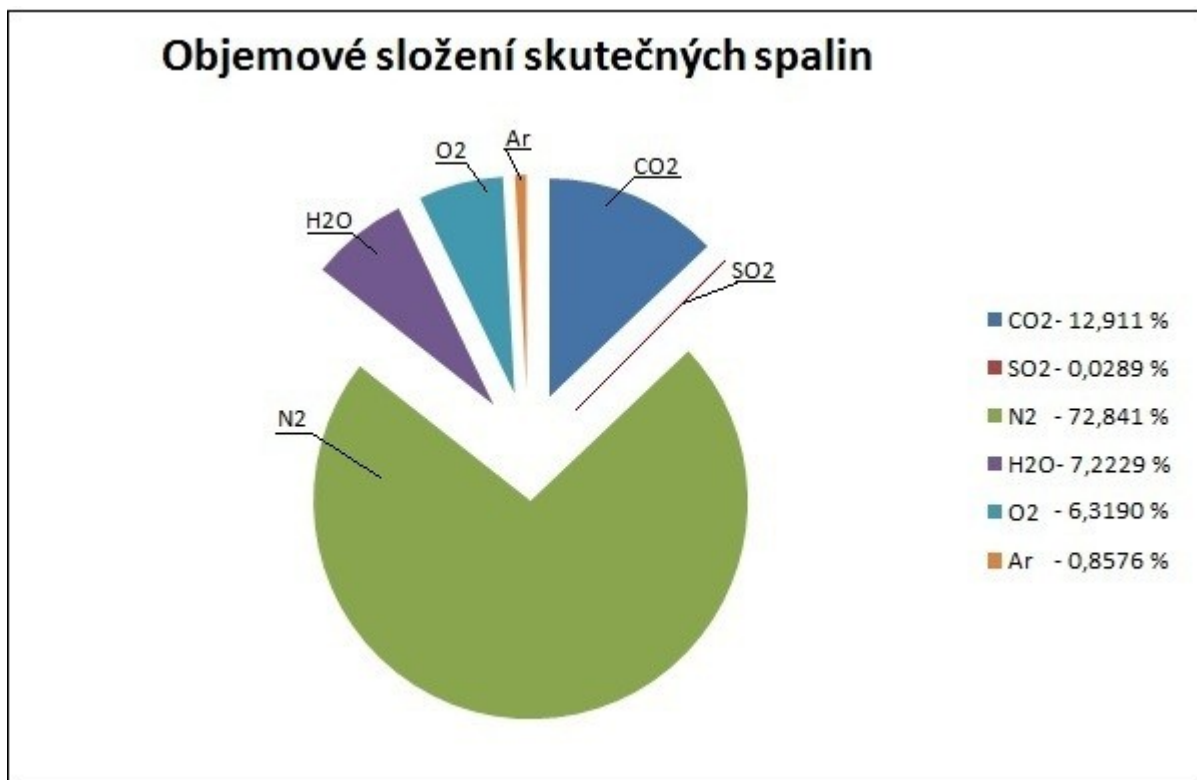
$$\omega_{Ar} = \frac{V_{Ar}}{V_{SPV,skut}} \cdot 100 = \frac{0,07477}{8,7180} \cdot 100 = 0,8576 [\%] \quad (\text{rovnice 4.31})$$

Pro kontrolu:

$$\Sigma \omega = \omega_{CO_2} + \omega_{SO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O} + \omega_{O_2} + \omega_{Ar}$$

$$\Sigma \omega = 12,9110 + 0,0289 + 72,8410 + 7,2229 + 6,1390 + 0,8576$$

$$\Sigma \omega = 100,00$$



Graf 4-3 Objemové složení skutečných spalín

Objem spalín z 1kg paliva při teplotě $t_s = 130$ [°C], s přebytkem vzduchu $n=1,3$

$$V_{SPV,skut}^t = V_{SPV,skut} \cdot \frac{273,15 + t_s}{273,15} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rovnice 4.32})$$

$$V_{SPV,skut}^t = 8,7180 \cdot \frac{273,15 + 130}{273,15}$$

$$V_{SPV,skut}^t = 12,8671 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Stanovení měrných tepelných kapacit spalín

Ke stanovení měrných tepelných kapacit spalín jsem použil tab. 4.9 z literatury [1], zadaná teplota spalín $t_s = 130$ [°C]. Pro co nejpřesnější určení měrných tepelných kapacit spalín jsem použil interpolační metodu.

$$c_{p_{CO_2}} = \frac{1,7863-1,6996}{200-100} \cdot (130 - 100) + 1,6996 = 1,7256 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$c_{p_{SO_2}} = \frac{1,9427-1,8631}{200-100} \cdot (130 - 100) + 1,8631 = 1,8868 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$c_{p_{O_2}} = \frac{1,3372-1,3193}{200-100} \cdot (130 - 100) + 1,3193 = 1,3246 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$c_{p_{H_2O}} = \frac{1,5227-1,5062}{200-100} \cdot (130 - 100) + 1,5062 = 1,5111 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$c_{p_{N_2}} = \frac{1,2994-1,2951}{200-100} \cdot (130 - 100) + 1,2951 = 1,2963 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$c_{p_{SP}} = c_{p_{SP}} \cdot \omega_{CO_2} + c_{p_{SO_2}} \cdot \omega_{SO_2} + c_{p_{N_2}} \cdot \omega_{N_2} + c_{p_{H_2O}} \cdot \omega_{H_2O} + c_{p_{O_2}} \cdot \omega_{O_2} \quad (\text{rovnice 4.33})$$

$$c_{p_{SP}} = 1,7256 \cdot 0,12911 + 1,8869 \cdot 0,0289 + 1,3246 \cdot 0,06139 + 1,2963 \cdot 0,7284 \\ + 1,5111 \cdot 0,07222$$

$$c_{p_{SP}} = 1,4122 \text{ [m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

5. Účinnost kotle

Účinnost transformace energie je z technicko-ekonomického hlediska jedním z nevýznamnějších parametrů spalovacího zařízení a udává míru využití energie paliva. Energie, která při transformaci nebude využita, představuje ztráty, které mohou být ve formě tepla nebo nespáleného paliva. Obecně je účinnost definována jako poměr výkonu ku příkonu. V uvažovaném případě bude příkonem vždy energie, dodaná do spalovacího zařízení v palivu, a výkonem bude výrobní teplo, které musíme dodat vstupující vodě, abychom získaly výstupní páru o daných parametrech.

Zatímco výrobní teplo si můžeme jednoznačně stanovit, tak příkon při spalování uhlí definovat neumíme. Proto jsem pro výpočet účinnosti kotle zvolil metodu stanovení účinnosti ze ztrát, tzv. metoda nepřímá (ztrátová). Metoda spočívá ve stanovení tepelných ztrát kotle $\sum_1^i Z_i$, a následné odečtení ztrát od maximální teoretické účinnosti spalovacího zařízení, která je 100 [%], (viz rovnice č. 5.1).

$$\eta_k = 1 - \sum_1^i Z_i \quad (\text{rovnice 5.1})$$

5.1 Tepelné ztráty kotle

Při stanovení tepelných ztrát kotle jsem počítal s výhřevností paliva, nikoliv s redukovanou výhřevností, jelikož předpokládám, že uhlí na vstupu bude mít stejnou teplotu jako je teplota vztažná $t_o = 20$ [°C]. Nasávaný vzduch bude přehříván recirkulací horkého vzduchu.

Do tepelných ztrát kotle jsem zahrnul tyto ztráty:

- ztráta mechanickým nedopalem Z_C ,
- ztráta chemickým nedopalem Z_{CO} ,
- ztráta sáláním a vedením tepla do okolí Z_{sv} ,
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků Z_f ,
- ztráta citelným teplem spalin Z_k .

5.1.1 Ztráta mechanickým nedopalem

Představuje ztrátu nespálenou hořlavinou v tuhých zbytcích. Tyto výpočty jsem zpracoval na základě literatury [1]. Hodnoty podílu spalitelných látek v tuhých zbytcích jsem čerpal z tab. 5-1 a tab. 5-2 literatury [1].

$$Z_C = Z_{Ci} + Z_{Cú} [-] \quad (\text{rovnice 5.2})$$

Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce

$$Z_{Ci} = \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot x_i \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot Q_{Ci} \quad (\text{rovnice 5.3})$$

$$Z_{Ci} = \frac{0,05}{1 - 0,05} \cdot 0,15 \cdot \frac{0,2205}{23420} \cdot 32600$$

$$Z_{Ci} = 0,0002423 [-]$$

Ztráta mechanickým nedopalem v úletu

$$Z_{Cú} = \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot x_i \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot Q_{Ci} \quad (\text{rovnice 5.4})$$

$$Z_{Cú} = \frac{0,03}{1 - 0,03} \cdot 0,80 \cdot \frac{0,2205}{23420} \cdot 32600$$

$$Z_{Cú} = 0,00759 [-]$$

Celková ztráta mechanickým nedopalem

$$Z_C = Z_{Ci} + Z_{Cú}$$

$$Z_C = 0,0002423 + 0,00759$$

$$Z_C = 0,00783 [-]$$

5.1.2 Ztráta chemickým nedopalem

Ztráta chemickým nedopalem vyjadřuje teplo unikající důsledkem obsahu nespálených plynů ve spalinách. Emisní limit $\text{mgCO} [\text{mg}/\text{Nm}^3]$ a obsah kyslíku $\text{O}_{2,\text{ref}} [\%]$ pro referenční stav spalin jsem určil z tab. 5-3 literatury [1].

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot V_{SPS,skut}}{(21 - O_{2,ref}) \cdot Q_i} \quad (\text{rovnice 5.5})$$

$$Z_{CO} = \frac{0,2116 \cdot 250 \cdot 8,0883}{(21 - 0,06) \cdot 23420}$$

$$Z_{CO} = 0,000872 \quad [-]$$

5.1.3 Ztráta sáláním a vedením do okolí

Tuto ztrátu volím podle druhu použitého paliva a výrobního tepla kotle, odečtením z tab. 5-1 literatury [1].

$$Z_{sv} = 0,003 \quad [-]$$

5.1.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

$$Z_f = \sum Z_{fi} = Z_s + Z_p$$

Ztráta fyzickým teplem strusky

$$Z_s = \frac{X_s}{1 - C_i} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot c_s \cdot t_s \quad [-] \quad (\text{rovnice 5.6})$$

$$Z_s = \frac{0,15}{1 - 0,05} \cdot \frac{0,2205}{23420} \cdot 0,9301 \cdot 600$$

$$Z_s = 0,0008296 \quad [-]$$

Ztráta fyzickým teplem popílku v úletu

$$Z_p = \frac{X_p}{1 - C_i} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot c_p \cdot t_p \quad [-] \quad (\text{rovnice 5.7})$$

$$c_p = \frac{0,8498 - 0,8036}{200 - 100} \cdot (130 - 100) + 0,8036 = 0,8174 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$Z_p = \frac{0,80}{1 - 0,03} \cdot \frac{0,2205}{23420} \cdot 0,8174 \cdot 130$$

$$Z_p = 0,0008251 \quad [-]$$

$$Z_f = Z_s + Z_p$$

$$Z_f = 0,001654 \quad [-]$$

5.1.5 Ztráta citelným teplem spalín (komínová)

Tato ztráta představuje teplo, které odchází z kotle v kouřových plynech, a nejvíce ovlivňuje celkovou účinnost kotle. Velikost této ztráty závisí na teplotě spalín a přebytku vzduchu ve spalínách za kotlem. Rovnice 5.8 byla převzata z literatury [5].

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot V_{SPV, skut}^t \cdot \frac{c_{pSP} \cdot (t_s - t_o)}{Q_i} \quad (\text{rovnice 5.8})$$

$$Z_k = (1 - 0,00783) \cdot 12,8671 \cdot \frac{1,4122 \cdot (130 - 20)}{23420}$$

$$Z_k = 0,08467 \quad [-]$$

5.2 Stanovení účinnosti kotle

$$\eta_k = 100 - \sum Z_i = 100 - (Z_c + Z_{CO} + Z_{sv} + Z_f + Z_k) \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{rovnice 5.9})$$

$$\eta_k = 100 - (0,00783 + 0,000872 + 0,003 + 0,001654 + 0,084678) \cdot 100$$

$$\eta_k = 90,2011 \quad [\%]$$

5.2.1 Množství paliva

Skutečné množství paliva přivedeného do kotle.

Podle množství paliva přivedeného do kotle se dimenzují dopravníky na uhlí, mlýny, vynašeče strusky a odlučovače popílku.

$$M_{pal} = \frac{Q_v}{Q_i \cdot \eta_k} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.10})$$

$$M_{pal} = \frac{514100}{23420 \cdot 0,901011}$$

$$M_{pal} = 24,3359 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Výpočtové množství spáleného paliva

Pro určení množství spalin a spalovacího vzduchu se používá výpočtové množství spáleného paliva.

$$M_v = M_{\text{pal}} \cdot (1 - Z_c) \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (\text{rovnice 5.11})$$

$$M_v = 24,3359 \cdot (1 - 0,00783)$$

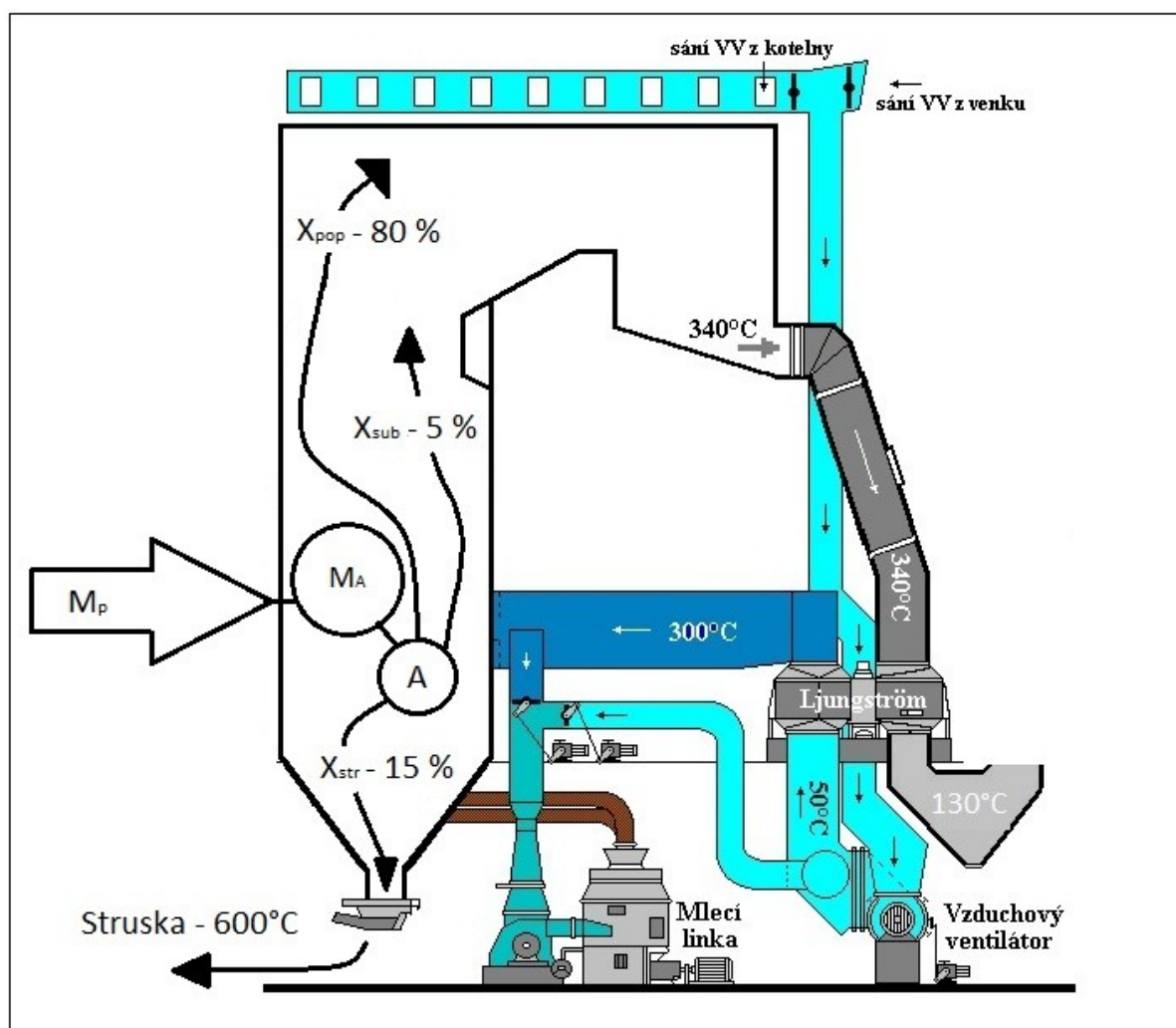
$$M_v = 24,1453 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

6. Stanovení popelové bilance a bilance na straně vzduchu

6.1 Popelová bilance

Při spalovacím procesu se do granulačního ohniště přivádí palivo (uhelný prášek), které zde vyhořívá. Při této reakci vzniká z popeloviny obsažené v palivu struska a popílek. U granulačních spalovacích zařízení nedochází k překročení hranice teploty tání popeloviny, proto je část popeloviny $X_{str} = 15$ [%] odváděna ze spalovací komory v tuhém stavu.

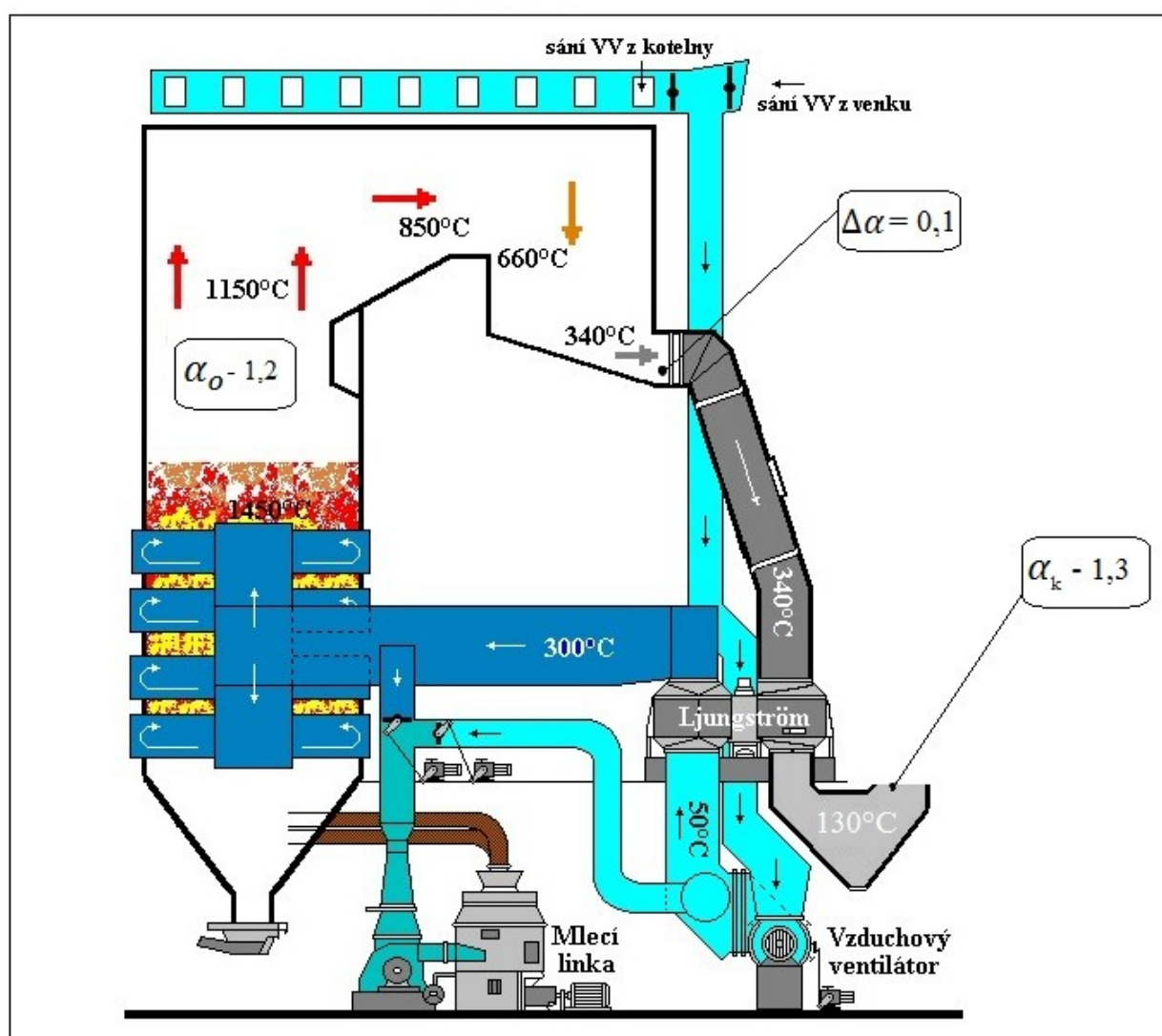
Ve spodní části kotle je umístěna strusková výsypka, která je pod celým průřezem ohniště. Zabezpečuje utěsnění spodní části ohniště, v principu je mechanický odstruskovač zaplaven vodou, aby nedocházelo k přísávání falešného vzduchu. Jako nejvýznamnější podíl z popeloviny u granulačního ohniště tvoří popílek $X_{pop} = 80$ [%], ten se odvádí se spalinami dále za kotel, kde se v odlučovačích odloučí. Zbylé procento popeloviny $X_{sub} = 5$ [%] sublimuje. Na obr. 6.1 je znázorněn odvod popeloviny z ohniště.



Obr. 6.1 – Schéma popelové bilance [6]

6.2 Bilance na straně vzduchu

Při stechiometrickém spalování se obvykle vychází z hodnot minimálního spalovacího vzduchu, to má však za následek vysoký nedopal paliva. Při spalování paliva v praxi se přivádí větším množstvím spalovacího vzduchu, který je vyjádřen jako přebytek vzduchu α [-]. Na výstupu z ohniště je přebytek spalovacího vzduchu α_0 [-], přičemž na vytvoření tohoto přebytku je zapotřebí řízení spalovacího vzduchu a v případě podtlakových ohnišť také přísávaného vzduchu. Příčinou přísávání falešného vzduchu je netěsnost spojů, která je způsobená podtlakem vyvozeným sacím účinkem spalínového ventilátoru. Kotle se svařovaných membránových stěn mají obecně menší přísávání než kotle se zazdívkou a rozebíratelným oplechováním. Míra přísávání falešného spalovacího vzduchu také závisí na aktuálním výkonu kotle. Na obr. 6.2 je znázorněno schéma kotle, kde jsou vyznačeny přebytky vzduchu a také součinitel přebytku vzduchu $\Delta\alpha$ [-] vlivem netěsnosti.



Obr. 6.2 Schéma bilance vzduchu [6]

7. Vliv obsahu balastu na jednotlivé ztráty

Množství vody a popeloviny v tuhém palivu lze nazvat jako balast (přítěž). V následující kapitole popisují druhy balastu a jejich vliv na jednotlivé tepelné ztráty.

7.1 Obsah vody v palivu

Obsah vody v tuhém palivu se určuje laboratorně a lze jej rozdělit na několik druhů.

- *Přimísená voda* - se do uhlí dostává až po jeho vytěžení a lze ji od paliva oddělit mechanicky (odstředěním). Přimísenou vodu obsahují např. kaly nebo praná uhlí.
- *Hrubá voda* - jedná se o vodu, která se odpaří při volném vysychání rozdrceného paliva na vzduchu.
- *Hydroskopická (zbytková) voda* - jedná se o vodu kapilárně vázanou, která zbyla v palivu po odpaření hrubé vody. Uvolňuje se sušením analytického vzorku paliva (zrno pod 0,2 mm) za zvýšené teploty při 105 [°C].
- V palivu se dále nachází *okludovaná voda*, ta se uvolňuje teprve při vyšších teplotách (nad 105 °C), ve vzorku je uzavřena v nejjemnějších kapilárách. Při rozboru se zahrnuje do hořlaviny.
- *Veškerá voda* - je v palivu obsazena a značí se W [kg/kg⁻¹] [%].

Voda obsažená v palivu je nevyužitelným balastem. Obsah vody souvisí se stupněm prouhelnění těženého uhlí. Geologicky starší uhlí je více prouhelněné, a tím také obsahuje méně vody. Při spalování voda spotřebovává část energie v palivu pro odpařování a také zvětšuje objem spalin. Vlhké palivo se také špatně upravuje a vyžaduje v některých případech předsoušení, například při úpravě v mlecím zařízení.

7.2 Obsah popeloviny v palivu

Minerální složky, které se nacházejí v palivu, jsou nazývány popelovinou. Popelovinu podle původu vzniku lze rozdělit na popelovinu vlastní a přimísenou. Popelovina vlastní, nebo také vnitřní, je syngenetická a epigenetická. Syngenetická má původ přímo z rostlin, z nichž uhlí vzniklo, a je v hořlavině rovnoměrně rozptýlena. Její zastoupení v celkovém složení popeloviny je asi 2 %. Epigenetická popelovina byla zanesena do uhelné vrstvy v průběhu různých geologických změn a její množství kolísá. Přimísená je popelovina, která se dostává do paliva při dolování, je to hlušina mezivrstvy paliva. Popel je tuhý zbytek po spálení tuhého paliva, obvykle ve formě oxidů kovů, které jsou v nejvyšším stupni oxidace.

V ohništi kotle se při spálení uhlí z popeloviny obsažené v palivu vytvoří buď škvára, nebo struska a popílek. Struska je minerální zbytek paliva po jeho spálení při teplotách převyšujících teplotu tečení popela. Po rychlém ochlazení strusky se vytvoří sklovitá hmota. Po ochlazení strusky ve vodě a následné granulaci se struska odvede z ohniště, nadměrné kusy se drtí na velikost zrn asi 5 mm. Hrubozrnná skleněná drť, která takto vznikla, se časem vnitřním pnutím rozpadá na ostrohranný skelný prach. Nejjemnější frakcí popela je popílek. Jedná se o drobné minerální částice, které jsou unášeny spaliny. Tato jemná frakce se usazuje ve výsypkách kotle, nebo je unášena spaliny z kotle ven, a poté zachycena v odlučovači. Škvára a popílek obsahují i určitou část nespáleného paliva, hlavně uhlíku.

7.3 Vliv balastu na jednotlivé tepelné ztráty

Při stanovení vlivu balastu na jednotlivé tepelné ztráty jsem uvažoval s následujícími ztrátami:

- Ztrátu mechanickým nedopalem Z_c ,
- Ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků Z_f ,
- Ztráta citelným teplem spalin (komínová) Z_k .

Obsah vody a popeloviny nemá na ztrátu chemickým nedopalem a ztrátu sáláním do okolí praktický vliv.

7.3.1 Vliv popeloviny na ztrátu mechanickým nedopalem

Popelovina má vliv na všechny uvažované tepelné ztráty.

Ztráta mechanickým nedopalem ve strusce a úletu

Tuto ztrátu lze určit ze vztahu:

$$Z_c = Z_{ci} + Z_{cú} ,$$

kde Z_{ci} [-] vyjadřuje ztrátu nedopalem ve strusce nebo škváře, a $Z_{cú}$ [-] vyjadřuje ztrátu nedopalem v úletu, kde jemná frakce popeloviny se zachycuje v průtazích kotle, nebo prachových výsypkách, popřípadě je unášen spaliny z kotle pryč. Jednotlivé složky celkové ztráty mechanickým nedopalem Z_c [-] se určí ze vzorce:

$$Z_c = \frac{C_i}{1 - C_i} \cdot X_i \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot Q_{Ci} ,$$

kde C_i [-] je podíl hořlaviny ve strusce a úletu, X_i [-] je podíl popela ve strusce a úletu z celkového množství popeloviny A^r [-] v surovém vzorku paliva. Z rovnice je patrné, že podíl popela z celkového množství popeloviny, se podílí přímo úměrně na ztrátě mechanickým nedopalem.

7.3.2 Vliv popeloviny na ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků

Ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků ve strusce a úletu

Tuto ztrátu lze určit ze vztahu:

$$Z_f = \sum Z_{fi} = Z_s + Z_p,$$

Přičemž tato tepelná ztráta se skládá, podobně jako ztráta mechanickým nedopalem, ze ztráty ve strusce nebo škváře a ztráty v úletu. Určíme ji ze vzorce:

$$Z_s = \frac{X_i}{1 - C_i} \cdot \frac{A^r}{Q_i} \cdot c_i \cdot t_i,$$

kde C_i [-], A^r [-], X_i [-], mají stejný význam jako u ztráty mechanickým nedopalem. Z rovnice opět vyplývá, že podíl popela z celkového množství popeloviny, se podílí přímo úměrně na ztrátě mechanickým nedopalem.

7.3.3 Vliv popeloviny na ztrátu citelným teplem spalin

Popelovina ovlivňuje svým způsobem i komínovou ztrátu. Citelné teplo popílku zvyšuje entalpii spalin.

7.3.4 Vliv vody na ztrátu citelným teplem spalin

Obsah vody ve spalinách se projevuje na ztrátě citelným teplem spalin zvýšením množství spalin a nárůstem střední měrné kapacity c_{pSP} [$m_N^3 \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]. Dle vzorce:

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot V_{SPV,skut}^t \cdot \frac{c_{pSP} \cdot (t_s - t_o)}{Q_i},$$

kde je zřejmé, že vliv vody na ztrátu citelným teplem spalin je přímo úměrný.

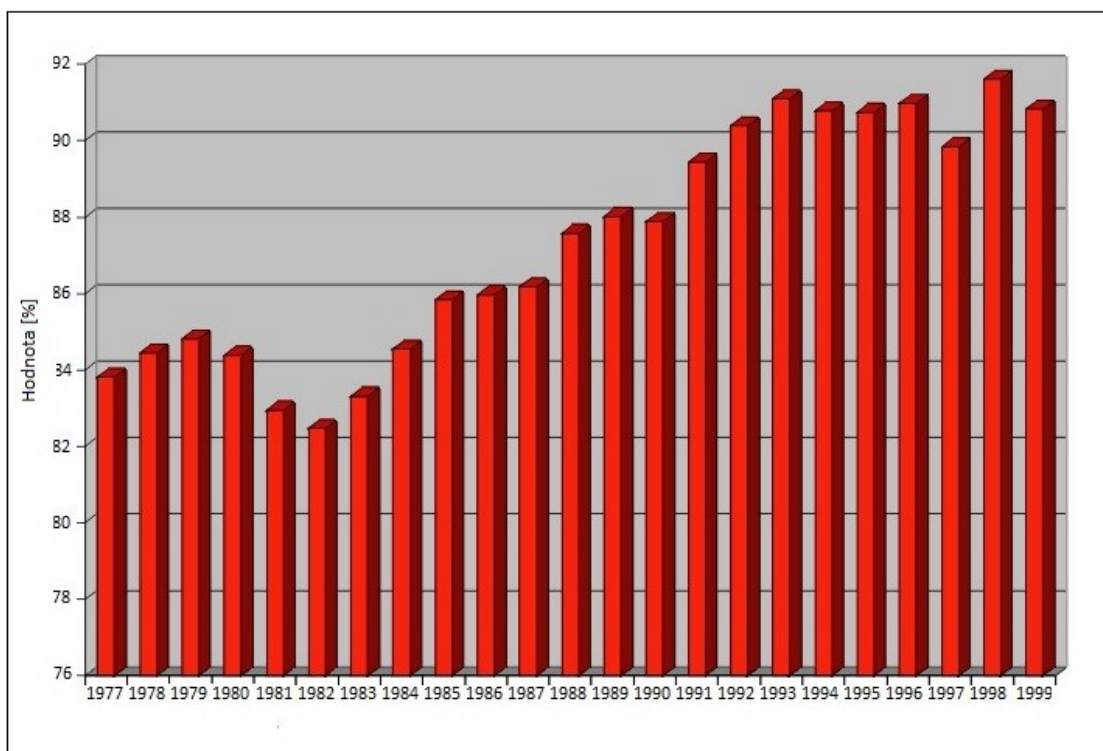
8. Porovnání účinnosti kotle

V této kapitole jsem porovnal a zhodnotil výsledky výpočtové části této práce s reálnými hodnotami získanými ze zdrojů [6] [12] ve stávajícím provozu elektrárny Dětmarovice.

Účinnost kotle

Vypočtená účinnost kotle, dle zadaných parametrů, spalujícího černé uhlí o výhřevnosti $Q_i^r = 23,42 \text{ [MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$, a dle daného prvkového rozboru byla při spalování uhlí ve vzhledu stanovena nepřímou (ztrátovou) metodou. Propočtená výsledná účinnost kotle η_k [%] dosáhla hodnoty 90,2011 [%], což odpovídá reálnému provozu elektrárny Dětmarovice, jejíž účinnost se průměrně pohybuje okolo 90 [%]. Pro znázornění uvádím graf. 8-1, na kterém je znázorněna účinnost kotle elektrárny Dětmarovice v letech 1977-1999. Vypočtená účinnost kotle, dle zadaných parametrů by odpovídala účinnosti v roce 1992.

Rozdíly v účinnosti jsou dány spalováním paliva v reálném období, jehož parametry byly odlišné od parametrů paliva použitého v této bakalářské práci. Zejména období 1977-1990 dokumentuje vliv zvýšeného podílu balastu u spalovaného uhlí. Pravděpodobně byl takový výrazný pokles účinnosti způsoben, kromě velkého podílu popelu, také podílem vody v palivu. Je vidět, že po roce 1990 se začal klást větší důraz na ekonomii provozu a smluvně se zajistilo projektované palivo.



Graf. 8-1 Znázornění účinnosti EDĚ od roku 1977-1999 [6]

9. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo stanovit účinnost granulačního kotle s přímým foukáním spalujícího černé uhlí ve vzhledu. Stechiometrickým výpočtem paliva jsem získal potřebné množství spalovaného vzduchu pro spalování, které jsem dále využil k určení potřebného množství přivedeného paliva. Dále jsem stanovil tepelné ztráty kotle, které jsem využil pro výpočet účinnosti kotle a to nepřímou (ztrátovou) metodou. Dále jsem vypracoval popelovou bilanci, kde jsem řešil objemy popeloviny v různých formách, odcházející z kotle, a také jsem vypracoval bilanci na straně vzduchu, který je potřebný pro spalování, a její vliv na spalovací proces.

V neposlední řadě jsem analyzoval vliv balastu na jednotlivé tepelné ztráty kotle. Výsledkem analýzy bylo zjištění, že voda má negativní dopad tím, že zvětšuje objem spalin a také zvyšuje střední tepelnou kapacitu spalin, která má přímo úměrný vztah s komínovou ztrátou. Podíl různých složek popeloviny má na jednotlivé uvažované tepelné ztráty kotle přímo úměrný vliv. V závěru bakalářské práce uvádím vypočtenou účinnost kotle a porovnávám ji s reálnou hodnotou ve stávajícím provozu.

Zvyšování účinnosti spalovacích zařízení je dnes velice aktuální téma, protože ovlivňuje nejen ekonomicko-hospodářský výsledek daného provozu, ale má také pozitivní dopad na životní prostředí. A to tak, že umožňuje snížit provozní náklady elektrárny v důsledku nižší spotřeby paliva pro dosažení stejného jmenovitého výkonu. Především pak snížení spotřeby paliva má pozitivní dopad na těžbu fosilních paliv, které se řadí do skupiny neobnovitelných zdrojů energie, tím, že prodlužuje životnost stávajících zásob uhlí. Znamená tedy také ekologický přínos pro životní prostředí. Zvyšováním účinnosti kotle se snižuje produkce škodlivin, a rovněž je to akceptovatelná cesta ke snížení produkce CO_2 .

Seznam použité literatury

- [1] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*, Praha: ČVUT, 2007. 212 s.
ISBN 978-80-01-03757-7
- [2] VILIMEC, Ladislav. *Řízení a regulace energetických zařízení*, Ostrava: VŠB, 2008. 224 s.
ISBN 978-80-248-1853-5
- [3] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I*, Ostrava: VŠB, 2002. 116 s. ISBN 80-248-0076-4
- [4] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II*, Ostrava: VŠB, 1999. 151 s. ISBN 80-7078-681-7
- [5] NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování uhlí*, Ostrava: VŠB. 2005. 62 s. ISBN 80-248-0204-X
- [6] ČECH, Bohumír. *Prezentační album elektrárny Dětmárovice*.
- [7] NOSKIEVIČ, Pavel. *Účinnost spalovacích zařízení*, pro předmět spalování a spalovací zařízení.
- [8] POLACH, Vladislav. *Parní kotle*, Plzeň: ZČU, 2011. 76 s.
- [9] MÍKA, Jiří. *Průmyslová energetika*, text k přednáškám, Ostrava: VŠB, 2012. 77 s.
- [10] <http://projekty.fs.vsb.cz/414/parni-kotle.pdf>
- [11] <http://www.transformacni-technologie.cz/fosilni-paliva-jejich-vyuziti-v-energetice-a-ekologicke-dopady.html>
- [12] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/detmarovice.html>